



TITLE:

Geometrical Responses in Topological Materials(Abstract_要 旨)

AUTHOR(S):

Sumiyoshi, Hiroaki

CITATION:

Sumiyoshi, Hiroaki. Geometrical Responses in Topological Materials. 京都大学, 2017, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2017-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20162>

RIGHT:

論文[22]および[25]中の図を使用。論文[22]: H.-J. Kim, K.-S. Kim, J.-F. Wang, M. Sasaki, N. Satoh, A. Ohnishi, M. Kitaura, M. Yang, and L. Li. "Dirac versus Weyl Fermions in Topological Insulators: Adler-Bell-Jackiw Anomaly in Transport Phenomena" Phys. Rev. Lett. 111, 246603 (2013) DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.246603>. <http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.111.246603>, 論文[25]: X. Huang, L. Zhao, Y. Long, P. Wang, D. Chen, Z. Yang, H. Liang, M. Xue, H. Weng, Z. Fang, et al.. "Observation of the Chiral-Anomaly-Induced Negative Magnetoresistance in 3D Weyl Semimetal TaAs" Phys. Rev. X 5, 031023 (2015) <http://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.5.031023> DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevX.5.031023>.

(続紙 1)

京都大学	博 士（理 学）	氏名	住吉 浩明
論文題目	Geometrical Responses in Topological Materials （トポロジカル物質における幾何学応答）		
（論文内容の要旨）			
<p>近年、トポロジカル物質とよばれる物質群について精力的に研究が行われている。トポロジカル物質は、その波動関数のもつ非自明な位相幾何学的性質によって特徴づけられるが、たとえば量子Hall効果やアキオン電磁応答といった電磁応答によって、その性質を直接観測することが可能なものが存在することが知られている。一方で、熱応答、粘性応答、格子歪みや格子欠陥に対する応答といった電磁応答以外の応答を用いることで初めてその位相幾何学的性質を観測することが可能となるものの存在も明らかにされてきた。これらの応答は理論的には微分幾何学の言葉で記述されるため幾何学応答とよばれる。このような背景の下、本論文では以下の2種類のトポロジカル物質における幾何学応答を理論的に議論した。[1]時間反転対称性の破れた超伝導体における異常熱Hall効果。[2]Weyl半金属における、格子欠陥によって引き起こされる新しい輸送現象であるトーションカイラル磁気効果。</p> <p>[1]時間反転対称性の破れた2次元トポロジカル超伝導体はバルクのチャーン数によってその位相幾何学的性質が特徴づけられるが、超伝導平均場理論において電荷は保存量ではないので、量子Hall系の場合と異なり、電磁応答ではなく、熱応答によってこの特徴付けが議論される。先行研究によって、このチャーン数が異常熱Hall伝導度として発現することが知られていた。しかしながら、この研究は端状態の低エネルギー有効理論であるカイラルモードにもとづくため、低温極限でのみ予言能力がある。そこで本研究では、バルクの理論にもとづき異常Hall効果について研究を行い、異常熱Hall伝導度に対する一般的な公式を導出した。この公式は、ノードの無いトポロジカル超伝導体の低温極限における先行研究の結果をその特別な場合を含む。さらに、有限温度、ノードのある時間反転対称性の破れた超伝導体にも適用可能であり、例えばWeyl超伝導体のようなトポロジカル超伝導体以外のトポロジカル物質の探求にも有用であるといえる。</p> <p>[2]Weyl半金属は1つまたは複数のWeyl点の対をその波数空間に持つ物質群である。Weyl半金属においては、カイラル磁気効果、異常Hall効果、負の縦磁気抵抗といった、カイラル量子異常に起因した特異な輸送現象が理論的に提案されており、一部は実験的にも観測されている。このなかでも、カイラル磁気効果は、電場を印加しないにも関わらず印加された磁場と平行に電流が流れるという奇異な輸送現象であり、現実的な格子系において実現されうるかどうか議論され、その非存在定理が導かれていた。本研究では、格子欠陥に起因した仮想的な磁場によってWeyl半金属によって電流が引き起こされる現象である、トーションカイラル磁気効果の提案を行った。この効果の導出には、格子欠陥を記述するために、幾何学量である多脚場を使った線形応答理論を用いた。さらに強結合近似模型にもとづく数値計算によって、この効果が現実的な格子系でも起こりうることも示した。このことは、通常のカイラル磁気効果の場合と異なるため、先行研究で得られていた非存在定理をなぜ回避できるか明らかにした。最後に、この効果を実験的に観測するための手法の提案も行った。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

熱応答、粘性応答、格子歪みや格子欠陥に対する応答などは、理論的には微分幾何学の言葉で記述されるため幾何学応答とよばれる。近年、トポロジカル物質における幾何学応答について精力的に研究が行われ、トポロジカル物質の多彩な物性が引き出されることが明らかにされてきた。これらの応答は、電磁応答では検知することができなかった位相幾何学的性質を実験的に観測する可能性を示したという点で、特に重要であるといえる。このような背景の下、住吉氏は以下の2種類のトポロジカル物質における幾何学応答を理論的に議論した。[1]時間反転対称性の破れた超伝導体における異常熱Hall効果、[2]Weyl半金属における、格子欠陥によって引き起こされる新しい輸送現象であるトーショナルカイラル磁気効果、である。

[1]では、時間反転対称性の破れた超伝導体における異常熱Hall伝導度に対する一般的な表式を与えた。超伝導平均場理論において電荷は保存量ではないため、電磁応答によってトポロジカル超伝導体の位相幾何学的性質を実験的に観測することは困難である。そこで、本研究では、Luttingerによって提案された仮想的な重力場を用いた手法を用い、バルクの理論にもとづき異常熱Hall効果を議論した。本研究の成果は、時間反転対称性の破れた超伝導体における異常熱Hall伝導度に対する一般的な表式を導出し、Bogoliubov-de Gennesハミルトニアンから定義されるBerry曲率と異常熱Hall効果の関係を与えたことである。また、得られた公式を2次元トポロジカル超伝導体に適応し、低温極限において、先行研究における結果を再現することを確かめた。さらに、本研究で得られた公式は、例えばWeyl超伝導体(候補物質: URu_2Si_2)のようなトポロジカル超伝導体以外の超伝導体にも適応可能であり、広くトポロジカル物質の探求に有用な結果であるといえる。

[2]では、格子欠陥に起因した仮想的な磁場によってWeyl半金属によって電流が引き起こされる現象である、トーショナルカイラル磁気効果の提案を行った。近年、Weyl半金属において、例えばカイラル磁気効果のような、元は高エネルギー物理学の概念である量子異常に起因した特異な輸送現象が提案されている。本研究では、カイラル磁気効果の類似物で、格子欠陥に起因した仮想的な磁場によって電流が引き起こされる効果であるトーショナルカイラル磁気効果の提案を行った。この導出は多脚場を用いた線形応答理論にもとづく。さらに強結合近似模型にもとづく数値計算によって、この効果が現実的な格子系でも起こりうることも示した。このことは、通常のカイラル磁気効果の場合と異なるため、理論的に興味深いといえる。さらに、この効果を実験的に観測するための手法の提案も行い、Weyl半金属を探索する上で有用であることを示した。

このように、本論文はトポロジカル物質の探求における基礎となるものである。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成28年12月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。